第 38 卷第 3 期
2018 年 2 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.3
Feb.,2018

DOI: 10.5846/stxb201712052191

孔令桥,张路,郑华,徐卫华,肖燚,欧阳志云.长江流域生态系统格局演变及驱动力.生态学报,2018,38(3):741-749.

Kong L Q,Zhang L,Zheng H,Xu W H,Xiao Y,Ouyang Z Y.Driving forces behind ecosystem spatial changes in the Yangtze River Basin.Acta Ecologica Sinica,2018,38(3):741-749.

长江流域生态系统格局演变及驱动力

孔令桥[1,2],张 路[1],郑 华[1],徐卫华[1],肖 燚[1],欧阳志云[1,*]

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085

2 中国科学院大学,北京 100049

摘要:长江流域生态系统格局复杂,多种社会经济、政策和自然因素对土地利用变化的影响使得生态环境发生变化。分析了 2000 年至 2015 年长江流域生态系统格局和演变特征,及主要驱动力对生态系统变化的贡献。15 年间,共有约 6.4 万 km^2 的生态系统类型发生变化,城镇增长 67.5%,农田缩减 7.5%,森林增加 2.1%,剧烈的生态系统变化集中于下游,以及中上游的大城市,城镇聚集区以及退耕还林区。生态系统景观破碎化程度和景观多样性提高。上、中、下游生态系统格局、构成差异较大,15 年间,上游和下游森林显著增加,下游城镇显著扩张、农田和湿地显著缩减,上游湿地增加最为显著。城镇化是生态系统格局演变的首要驱动力,对生态系统变化的贡献率达 48.0%,长江下游城镇化的贡献率高达 64.5%。生态保护与恢复工程是第二驱动力,对生态系统变化的贡献率为 32.8%,在上游高达 47.8%。水资源开发和农业开发贡献率分别为 8.5%和 9.9%,此外,气候变化促使高原湖泊面积增大。为保护长江流域生态系统的可持续发展,需划定生态保护红线,合理规划城市化进程中的土地利用,保护优质耕地,禁止重要湿地的开发。

关键词:长江流域;生态系统;空间格局;驱动力

Driving forces behind ecosystem spatial changes in the Yangtze River Basin

KONG Lingqiao[1,2],ZHANG Lu[1],ZHENG Hua[1],XU Weihua[1],XIAO Yi[1],OUYANG Zhiyun[1,*]

1 *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: There are obvious differences among the upper, middle, and lower reaches in the natural environment in the Yangtze River Basin. The regional topography and climatic conditions are significantly distinct, and economic development is unbalanced. The impacts of various socioeconomic factors, policies, and natural factors on land use stimulate changes in the ecological environment. Therefore, knowledge of the ecosystem′s patterns, characteristics, and driving forces is the basis for studying the ecosystem services, ecological environmental problems, and ecological risk assessments. The ecosystem patterns, changing characteristics, and primary driving forces were analyzed from 2000 to 2015 in the Yangtze River Basin. During the 15-year period, about 6.4×10^4 km^2 of the ecosystem changed, including a 67.5% increase in urban land, 2.1% increase in forest growth, and 7.5% reduction in croplands. These dramatic changes were concentrated in the lower reaches, big cities in the upper and the middle reaches, urban agglomerations, and reforested cropland areas. Ecosystem patterns and compositions in the upper, middle, and lower reaches were different. Forests and wetlands in the upper reach and urban land in the lower reach increased significantly, whereas croplands and wetlands in the lower reach decreased substantially. Through the analysis of landscape patterns, the degree of landscape fragmentation, as well as

基金项目:中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STS-ZDTP-010)

收稿日期:2017-12-05; **网络出版日期:**2018-01-04

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zyouyang@ rcees.ac.cn

landscape diversity, increased. Between the years 2000 and 2015, the change in ecosystem patterns in the Yangtze River Basin was influenced by urbanization, ecological conservation and restoration, water resource development, agricultural development, geological hazards, and climate change. The contributions of the primary driving forces to ecosystem changes varied for the upper, middle, and lower reaches. The first important driving force was urbanization, with a contribution rate of 48.0% and up to 64.5% in the lower reach. The second important driving force was ecological conservation projects, with a contribution rate of 32.8% and up to 47.8% in the upper reach. Water resource development and agricultural development contributed 8.5% and 9.9%, respectively. In addition, the area of plateau lakes increased due to climate change. To sustainably protect the ecosystem in the Yangtze River Basin, the design of the ecological conservation redlines, reasonable land use planning in urbanization, conservation of high quality cropland, and the prohibition of development on important wetlands are necessary.

Key Words: Yangtze River Basin; ecosystem; spatial pattern; driving forces

长江是我国第一大河,是南水北调东、中、西三条线路等我国水资源配置的战略水源地,是连接东中西部的"黄金水道"[1],作为中国最长的河流,长江有多样化的生态环境,也是全球生物多样性最为丰富的区域之一,是世界自然基金会在全球重点保护的 35 个优先生态区之一[2-3]。长江经济带是世界上人口最多、产业规模最大、城市体系最完整的巨型流域经济带,其人口和地区生产总值超过全国的 40%,也是我国以"两屏三带"为主体的生态安全战略格局的重要组成部分[4]。

长江流域自然环境复杂,上中下游自然分异明显,各区域地形地貌、气候条件差异显著,国民经济发展不平衡[5-6],生态系统的分布和变化在空间上地区差异性显著。对资源与能源的过度利用和无序开发,使得长江流域部分区域生态系统退化严重[4,7]。随着我国城镇化进程加快,长江流域多数省市的土地开发强度均远超全国平均水平,另一方面,长江中上游防护林体系建设工程、天然林保护工程、退耕还林工程,促进了长江流域的植被恢复[8]。影响长江流域土地利用变化的社会经济因素、政策因素和自然因素多且复杂。

因此,揭示长江流域生态系统格局、演变特征及驱动力,是研究长江流域生态系统服务功能及变化、生态环境问题及变化和生态风险评价的基础。国际上对相关问题的研究主要包括利用遥感手段获取土地利用空间分布变化[9-10],以及与社会经济的关系[11-13],土地利用变化对生态系统服务功能的影响[14-16],土地利用变化的情景模拟[17-18],及其对生态系统可能产生的影响[19]等。国内已有研究主要在中小尺度探讨某区域或城市的生态系统格局变化或单一生态系统的演变,如长江源区[20-22]、太湖流域[23-24]、长江上游地区[25-27]、三峡库区水源涵养重要区[28-29]、巢湖流域[30-31]、长三角地区[12,32-35]等。

本文通过分析长江流域生态系统空间分布和构成及变化特征(2000 年至 2015 年),揭示长江流域生态系统格局和演变特征,分析主要驱动力对生态系统变化的贡献,探讨长江流域生态保护对策。

1 研究区概况

研究范围包括整个长江流域,总面积约为 178 万 km^2,如图 1 所示。研究区的生态系统类型主要有森林、灌丛、草地、湿地、农田及城镇(图 2)。研究区内包含上游 6 个子流域,中游 4 个子流域和下游 2 个子流域。整个研究范围涉及我国 17 个省,8 个城市群。长江流域地势西高东低,贯穿中国地势的三大阶梯,地貌类型多样,可分为高原、山地、丘陵和平原四大类[36],自然环境非常复杂,生物多样性十分丰富。

2 数据来源及研究方法

生态系统分类数据来自由中国科学院和环保部支持的全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查与评估项目[37],以及全国生态环境五年变化(2010—2015 年)遥感调查与评估项目。2000 年和 2015 年全国尺度土地覆被数据集以 30 m 分辨率的国产环境灾害卫星(HJ-1A/B)和美国陆地卫星(Landsat OLI)数据为信



图 1　研究区域

Fig.1　Study area

息源,在大量地面调查样点构建的分类样本库支持下,采用面向对象的多尺度分割、建立决策树进行分类的方法得到。生态系统分为八大类:森林、灌丛、草地、湿地、农田、城镇、荒漠和其他(冰川/永久积雪和裸地),包含 22 个二级子类和 42 个三级子类。本研究根据长江流域生态系统组成特征,将其重分类为 8 个一级类,22 个二级类(表 1)。

采用 ArcGIS 10.3 进行空间数据裁切、栅格计算、空间分析和统计等。使用 ENVI 4.8 变化检测模块计算生态系统转移的空间分布及面积构成。通过分析各类生态系统在上、中、下游及全流域的空间分布、面积构成,生态系统变化面积及变化率,分析长江流域生态系统空间分布格局及演变特征。将研究区划分为 10 km×10 km 的若干网格,计算网格内生态系统发生变化的面积比例,分级展示生态系统变化的热点区域,以及不同程度的生态系统变化在空间上的分布特征。

使用景观格局分析软件 Fragstats 4.2 计算长江流域 2000 年和 2015 年的生态系统的景观格局指数。分别在景观水平和类型水平上,计算全局及森林、灌丛、草地、湿地、农田、城镇、冰川/永久积雪和裸地的平均斑块面积、斑块数量、斑块密度、边缘密度及香农多样性指数,以评估长江流域生态系统的景观格局的变化,主要包括景观破碎化程度及景观多样性的变化。

在全流域和上中下游,通过计算由城市化侵占的农田、自然生态系统和裸地的面积,自然生态系统的转入量(森林、灌丛、草地、沼泽、湖泊和河流),高原区冰川与永久积雪向裸地及湖泊的转变,水库和河流的水表面积的增加,农田扩张造成的自然生态系统、城镇和裸地的减少,以及地震区生态系统的转变,分别分析和比较城市化、生态保护和恢复政策、气候变化、水资源开发、农业开发和地质灾害带来的生态系统的转变量,计算各驱动力下的生态系统变化量的占比,得出各驱动力对生态系统变化的贡献率。

3　结果与分析

3.1　长江流域生态系统格局特征

长江流域生态系统类型多,格局复杂,森林生态系统面积最大,总面积 60.9 万 km^2,占长江流域总面积的 34.2%,其次是农田、草地和灌丛,分别为 44.5 万 km^2,28.7 万 km^2 和 25.5 万 km^2,四类生态系统占全流域面积的 89.6%。长江流域湿地生态系统占 7.2 万 km^2,城镇生态系统为 6.5 万 km^2,分别占比 4.0%和 3.7%(图 2)。

就各类生态系统的构成来看,森林生态系统中,针叶林面积最大,占据森林总面积的 64.6%;灌丛生态系统中,以阔叶灌丛为主导,占比 97.7%;草地生态系统的构成以草原和草甸为主,占比 65.2%;湿地生态系统中,沼泽、湖泊、水库/坑塘和河流的总面积基本相当;农田生态系统中水田和旱地占比 97.2%;城镇生态系统

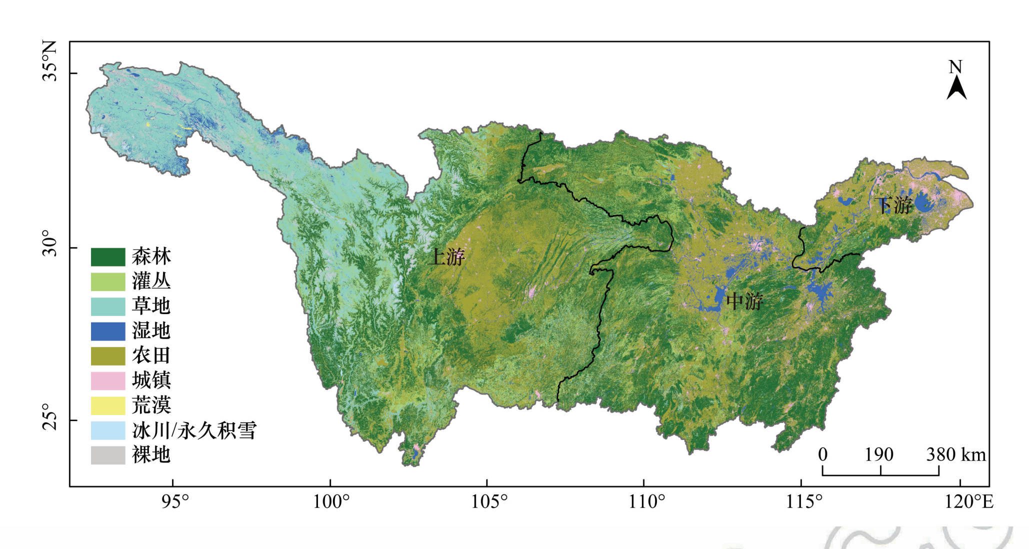


图 2 长江流域生态系统空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of ecosystems in the Yangtze River Basin

中建设用地占比 83.8%。长江流域生态系统的构成及占比见表 1。

表 1 生态系统面积及占比

Table 1 Area and proportion of ecosystems

生态系统类型 Ecosystem types		上游 Upstream		中游 Midstream		下游 Downstream		全流域 Whole basin	
		面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	总计/km²	占比/%
森林 Forest	阔叶林	68945.5	7.0	103077.8	15.3	19543.4	15.9	191566.7	10.8
	针叶林	208851.6	21.2	176983.0	26.3	7956.0	6.5	393790.6	22.1
	针阔混交林	8668.4	0.9	13521.5	2.0	1235.4	1.0	23425.4	1.3
	小计	286465.4	29.1	293582.3	43.7	28734.9	23.4	608782.6	34.2
灌丛 Shrub	阔叶灌丛	149129.1	15.1	98070.9	14.6	1969.7	1.6	249169.7	14.0
	针叶灌丛	3622.8	0.4	9.9	0.0	8.3	0.0	3641.0	0.2
	小计	152752.0	15.5	98080.7	14.6	1978.1	1.6	252810.8	14.2
草地 Grassland	草甸	71771.1	7.3	51.6	0.0	0.0	0.0	71822.7	4.0
	草原	115352.9	11.7	0.1	0.0	0.0	0.0	115353.0	6.5
	草丛	37307.7	3.8	16553.2	2.5	290.9	0.2	54151.8	3.0
	稀疏草地	45353.5	4.6	18.9	0.0	0.0	0.0	45372.4	2.5
	小计	269785.3	27.4	16623.8	2.5	290.9	0.2	286699.9	16.1
湿地 Wetland	沼泽	14059.3	1.4	1935.3	0.3	333.2	0.3	16327.8	0.9
	湖泊	2405.5	0.2	11222.1	1.7	5794.8	4.7	19422.4	1.1
	水库/坑塘	3142.1	0.3	10239.6	1.5	4706.4	3.8	18088.1	1.0
	河流	5069.9	0.5	9325.2	1.4	3432.5	2.8	17827.6	1.0
	小计	24676.8	2.5	32722.2	4.9	14266.9	11.6	71665.8	4.0
农田 Cropland	水田	55415.8	5.6	100901.9	15.0	50752.0	41.4	207069.7	11.6
	旱地	128523.5	13.0	94918.2	14.1	2813.4	2.3	226255.1	12.7
	园地	7580.6	0.8	3836.1	0.6	520.7	0.4	11937.3	0.7
	小计	191519.9	19.4	199656.1	29.7	54086.1	44.1	445262.1	25.0
城镇 Urban land	建设用地	10282.7	1.0	22938.4	3.4	21385.3	17.4	54606.4	3.1
	城市绿地	330.8	0.0	450.4	0.1	501.6	0.4	1282.7	0.1
	交通用地	1973.0	0.2	5310.3	0.8	1123.8	0.9	8407.1	0.5
	采矿场	315.4	0.0	414.1	0.1	161.3	0.1	890.8	0.1
	小计	12901.8	1.3	29113.1	4.3	23172.0	18.9	65186.9	3.7
冰川/永久积雪 Glacier/permanent snow	冰川/永久积雪	3262.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	3262.2	0.2
裸地 Bare land	裸地	42127.4	4.3	2331.7	0.3	25.8	0.0	44484.9	2.5

长江上游自然资源极其丰富,分布有大片的森林、灌丛、草地和湿地。针叶林在上游分布最广,面积达20.9万 km^2,同时 59.9%的阔叶灌丛和 99.5%的针叶灌丛分布于上游。草原、草甸和稀疏草地,以及 68.9%的草丛分布于上游,上游草地占长江流域草地生态系统总面积的 90%。同时,上游分布有最多的沼泽,在湿地生态系统中占主导,总面积达 1.4 万 km^2,占长江流域沼泽总面积的 86.1%。上游农田生态系统中,旱地占主导,达 12.9 万 km^2,且拥有长江流域 63.5%的园地。长江流域的冰川或永久积雪和 94.7%的裸地都分布于上游,总面积达 4.5 万 km^2。此外,上游城镇生态系统仅占长江流域城镇面积的 19.8%。

长江中游自然资源丰富,城镇化和农业水平都相对较高,分布有面积最大的森林、湿地、农田和城镇。森林生态系统中,针叶林依然占主导,同时长江流域 53.8%的阔叶林和 57.7%的针阔混交林分布于中游。长江流域 57.8%的湖泊、56.6%的水库/坑塘和 52.3%的河流分布于中游。长江中游分布有面积最大的水田,达10.1万 km^2,占长江流域水田总面积的 48.7%。同时,长江中游分布有最大的建设用地和交通用地,分别占全流域的 42.0%和 63.2%。

下游总面积仅占长江流域的 6.9%,而长江流域 35.5%的城镇用地、19.9%的湿地和 12.1%的农田密集分布于此。其中,建设用地占城镇面积的 92.3%,湖泊和水库坑塘占湿地面积的 73.6%,水田占农田面积的93.8%。此外,下游的城市绿地面积最大,占全流域城市绿地面积的 39.1%。

3.2　长江流域生态系统格局变化特征

2000 年至 2015 年,长江流域森林和城镇面积显著增加,农田面积显著减少(表 2)。其中,城镇面积的增幅最大,增长了 67.5%,农田面积减少幅度最大,减少了 7.5%。此外,湿地和裸地总面积增加,草地和冰川/永久积雪减少。长江流域共有约 6.4 万 km^2的生态系统发生了转变。占主导地位的转变是农田转变为城镇,农田转变为森林,农田与湿地的转变和农田转变为草地。

就生态系统的变化的具体构成来说,城镇生态系统中,面积增长最多的是建设用地,增长面积 2.1 万km^2,增长率 61.9%,交通用地和采矿场分别增长 105.1%和 196.6%。城市绿地增长 65.0%。农田生态系统中,旱地和水田分别减少了 2.9 万 km^2和 1.1 万 km^2,减少率分别为 11.4%和 5.1%。湿地生态系统中,沼泽减少了1.2%,而湖泊和水库坑塘均增加,增长率分别为 5.2%和 10.9%。

在长江上游,森林、城镇和湿地的面积总体增加,农田和冰川/永久积雪减少。阔叶林和针叶林面积增加最多,分别增长了 2.1%和 3.4%。旱地减少最多,减少了 9.3%。虽然上游城镇化水平相对较低,但建设用地增幅达 97.9%,采矿场增长 4.7 倍,交通用地增长 2.6 倍。此外,长江上游的湿地增加,主要体现在水库坑塘和湖泊,分别增加了 71.2%和 6.0%。

长江中游农田总体减少,城镇、湿地和森林总体增长。农田中旱地减少最多,减少率为 12.3%。建设用地和交通用地分别增长了 28.5%和 62.2%,采矿场增加了 2.6 倍。湿地共增加 3.9%,其中,湖泊增加了 10.4%。

长江下游城镇和森林显著增长,农田显著缩减,湿地总体减少。下游城镇增长最快,增长率为 104.5%,其中建设用地、交通用地和城市绿地分别增长 1 倍、3 倍和 1.2 倍。农田减少的也最快,总体减少了 18.4%,其中水田减少了 15.3%,旱地减少了 47.8%。同时,水库/坑塘减少 3.4%,湖泊减少 3.8%,沼泽减少 23.8%。

图 3 为生态系统转变率在长江流域的空间分布,剧烈的生态系统转变集中发生于长江流域下游,以及中游和上游的重庆、成都、武汉和长沙等大城市和城镇聚集区,以及贵州、江西、安徽等省份森林增加较显著的区域。

通过分析长江流域 2000 年与 2015 年的生态系统景观格局,15 年间,在景观水平上(表 3),长江流域生态系统平均斑块面积减小,斑块数量、斑块密度和边缘密度增加,香农多样性指数上升。因此,15 年间长江流域生态系统的总体破碎化程度加强,景观多样性提高。就各类生态系统来看(表 2),森林、灌丛、草地、农田和裸地的平均斑块面积减小,斑块数量、斑块密度和边缘密度增加,景观破碎度增强;而湿地、城镇和冰川的景观破碎度降低。

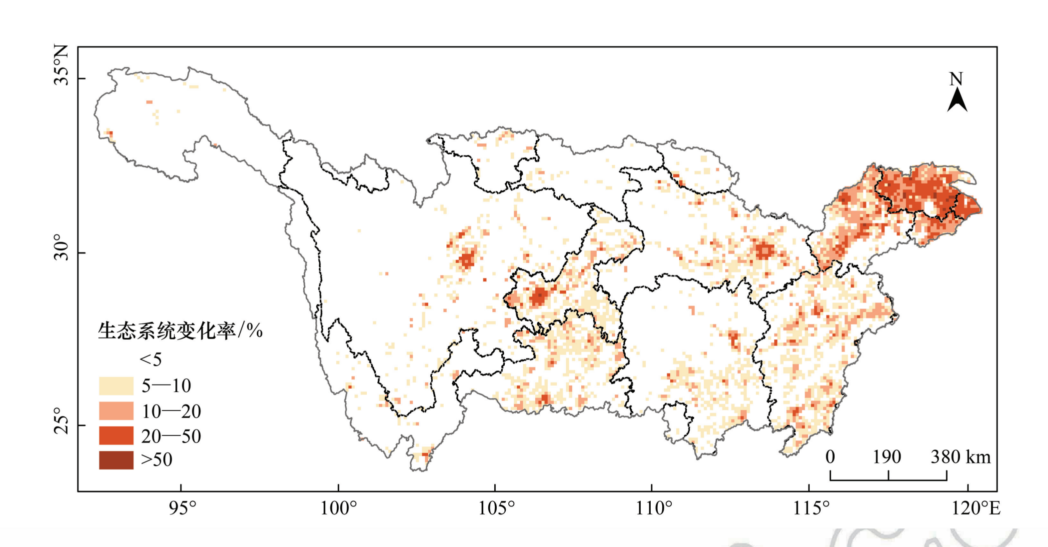


图 3 生态系统转变率空间分布图

Fig.3 Spatial pattern of ecosystem conversion rate

表 2 各类生态系统景观格局指数及变化

Table 2 Landscape pattern indexes of ecosystems at class level

类型水平 Class level	2000				2015			
	MPS/m^2	NP	PD	ED	MPS	NP	PD	ED
森林 Forest	204.16	292089	0.16	14.28	202.00	301452	0.17	14.63
灌丛 Shrub	47.86	531584	0.30	11.64	46.03	554267	0.31	11.98
草地 Grassland	113.15	257888	0.14	7.09	109.01	262953	0.15	6.88
湿地 Wetland	41.52	170367	0.10	2.47	44.93	159393	0.09	2.40
农田 Cropland	149.68	321806	0.18	12.63	132.12	337207	0.19	12.56
城镇 Urban land	19.95	194910	0.11	2.17	30.62	212720	0.12	2.86
冰川/永久积雪 Glacier/permanent snow	94.60	4148	0.00	0.10	105.20	3111	0.00	0.08
裸地 Bare land	71.44	60220	0.03	1.32	63.54	70010	0.04	1.40

MPS:平均斑块面积(m^2),mean patch size;NP:斑块数量,number of patches;PD:斑块密度,patch density;ED:边缘密度,edge density

表 3 全局尺度景观格局指数及变化

Table 3 Landscape pattern indexes of ecosystems at landscape level

景观水平 Landscape level	景观格局指数 Landscape pattern index				
	MPS/m^2	NP	PD	ED	SHDI
2000	97.15	1833012	1.03	25.85	1.61
2015	93.67	1901113	1.07	26.39	1.64

SHDI:香农多样性指数,Shannon diversity index

3.3 生态系统格局变化的原因与驱动力

2000—2015 年,长江流域生态系统格局的变化主要受到城镇化、生态保护与恢复、水资源开发、农业开发,以及地质灾害和气候变化等因素的影响。各驱动力带来的生态系统变化统计及贡献比例见表 4。

由于城市化的加速,大片农田转变为城镇,部分森林、灌丛、草地和湿地也被城镇用地侵占。城市化引起的生态系统的变化面积达 2.9 万 km^2,贡献比例达 48.0%,是影响长江流域生态系统变化的首要驱动力。其中,2.4 万 km^2农田转变为城镇,转变面积最大,其中农田大部分转变为建设用地,转变面积达 2.0 万 km^2,转变为交通用地的面积为 0.3 万 km^2。此外,0.2 万 km^2森林,0.1 万 km^2湿地,0.1 万 km^2灌丛和 590.9 km^2草地被城镇占据。

15 年间,长江流域实施了退耕还林还草、天然林保护工程、退田还湖等生态保护与恢复政策,促进了森

林、灌丛、草地和湿地的恢复和增加,总变化面积达到约 2.0 万 km²,是影响长江流域生态系统变化的第二驱动力。约 1.5 万 km²森林得到恢复,其中农田向森林的转变面积最大,达到 1.0 万 km²,0.2 万 km²农田转变为草地,0.2 万 km²农田转变为灌丛,501.2 km²的农田恢复为湿地。

表 4　驱动力影响下的生态系统变化

Table 4　Ecosystem changes under the influences of the driving forces

生态系统类型 Ecosystem types	变化面积 Ecosystem changes/km²				
	城镇扩张 Urbanization	生态保护 Ecological conservation	水资源开发 Water resource development	农业开发 Agricultural development	地质灾害/气候变化 Geologic hazard/ climate change
森林 Forest	-2032.8	14707.7	-462.5	-1140.9	-172.3
灌丛 Shrub	-1045.1	-566.7	-277.4	-1132.2	-10.5
草地 Grassland	-590.9	619.6	-181.6	-465.5	-4.9
湿地 Wetland	-1038.5	501.2	5070.2	-2720.7	228.3
农田 Cropland	-23768.6	-14940.1	-3518.1	5895.2	-2.7
城镇 Urban land	28575.7	0.0	-350.3	-366.2	0.0
冰川 Glacier	0.0	0.0	0.0	0.0	-123.9
裸地 Bare land	-99.9	-321.8	-280.3	-69.7	86.0
合计 Total	28575.7	19543.7	5070.2	5895.2	413.8
占比/% Proportion/%	48.0	32.8	8.5	9.9	0.7

长江流域的水资源开发导致湖泊、河流的水表面积增大,中下游地区的洪水多发,淹没水库和农田。此外,南水北调工程水源区大片农田被水库淹没。受水资源开发影响,长江流域湖泊、河流和水库的水表面积增加约 0.5 万 km²,是长江流域生态系统变化的重要驱动力。其中,农田所受影响最大,被水库和河流淹没的面积约 0.35 万 km²。

虽然长江流域农田总面积急剧减少,但局部的农业开发活动仍然侵占了部分湿地、森林、灌丛和草地等自然生境。农业开发带来的生态系统变化面积约 0.6 万 km²,是长江流域生态系统变化的重要驱动力。其中,湿地受影响最大,长江流域被农田侵占的湿地达 0.27 万 km²,其次是灌丛、森林和草地,分别为 0.11 万 km²,0.11万 km²和 465.5 km²。

地震也是长江流域生态系统变化的原因之一,尤其是 2008 年汶川地震和 2013 年雅安地震,对地震区的自然生境和农田带来一定程度的破坏。因地震造成的生态系统退化面积为 185.5 km²。气候变化导致长江上游生态系统的变化,是长江流域生态系统变化的原因之一。全球变暖引发长江上游冰川和永久积雪的融化,带来 228.3 km²的生态系统的变化,其中,122.8 km²的冰川或永久积雪变为裸地,222.3 km²的裸地变为高原湖泊。

各主要驱动力对生态系统变化的贡献程度在上、中、下游差异显著(图 4)。长江上游生态系统变化的首要驱动力是生态保护与恢复工程,其中,森林、灌丛和草地的恢复分别占全流域的 42.0%,43.6%和 77.2%。长江中游的首要驱动力是城镇扩张,被城镇侵占的湿地和农田分别是全流域的 45.9%和 29.8%。其次是生态保护与恢复工程、农业开发和水资源开发。在长江下游,城市化对生态系统变化的贡献率最高,其中被城镇侵占

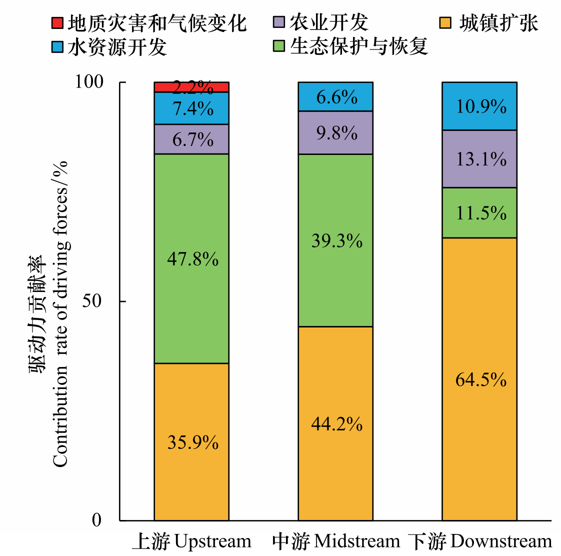


图 4　上中下游主要驱动力贡献率

Fig.4　Contribution of the primary driving forces in the upper, middle and lower reaches

的湿地和农田占全流域的49.6%和48.3%。其次是水资源开发和农业开发,其中农田对湿地的占用最显著,占全流域的79.7%。

4 结论与讨论

本文通过分析长江流域生态系统空间分布、构成及变化,揭示长江流域生态系统空间分布格局及其演变特征,分析了长江流域生态系统变化的驱动力及其对生态系统格局和变化的影响。

2000年至2015年,长江流域的森林和城镇的面积增加,农田面积减少。长江上游的自然生态系统增加最显著,下游的城镇和农田变化率最高。生态系统的剧烈变化集中于长江下游,以及长江流域中游和上游的重庆、成都、武汉和长沙等大城市。城市化是长江流域生态系统变化的首要驱动力。城市化使得农田缩减严重,对自然生境也存在一定的侵占。虽然城市化通过促进农村人口向城市转移,减少了人类对脆弱的生态系统的依赖,一定程度上促进了生态系统的保护和恢复[38],同时也有研究表明,长江流域农业地位的下降引起农民收入不稳定,特别在以农业为主要产业的省份,相对于我国其他地区呈下降趋势[8]。根据《长江经济带规划发展纲要》,长江经济带的城市化将进一步加速,因此需要在城市化进程中合理进行土地利用规划,对优质耕地进行保护,划定和执行生态保护红线。另一方面,我国近年来实施的生态保护和恢复工程也是影响长江流域生态系统变化的重要驱动力,对生态系统变化的贡献超过30%,生态保护成效较显著,然而由于人类活动的干扰,自然生境的破碎化程度增强,因此需加强自然生态系统连通性的维护和提高。此外,十五年间长江流域的湿地面积总体上升,这主要是由于气候变化和水利工程的建设带来的水表面积的增大。已有研究也表明气候变暖导致长江上游气温升高,降水增多,积雪减少,对长江流域的水资源量产生影响[39]。然而,虽然长江流域的湿地面积总体增加,由城市化和农业开发所造成的湿地丧失依然严重,尤其是沼泽和湖泊的丧失,湿地被城镇和农田侵占最为显著的是长江下游,占全流域的71.4%。已有研究也表明,长江流域围垦和基建占用造成湿地面积减少[40],导致生物多样性丧失,洪水调蓄能力减弱。因此应为湿地保护划定生态红线[2],禁止和限制重要湿地的开发活动,尤其是在人类活动干扰频繁的地区。

本研究在宏观上揭示了长江流域的生态系统总体分布格局、演变特征和驱动力,这对于研究长江流域生态系统服务功能、生态环境问题的变化,以及长江流域的生态风险,都具有重要意义。在此基础上,分析长江流域生态系统变化的产生机制,生态系统未来变化的模拟和预测,在不同空间尺度进一步剖析生态系统变化特点和驱动因子的相互耦合作用,是进一步研究的方向。

参考文献(References):

[1] 姚瑞华, 赵越, 杨文杰, 赵康平, 孙运海, 徐敏, 路瑞. 长江经济带生态环境保护规划研究初探. 环境保护科学, 2015, 41(6): 15-17, 28-28.
[2] 薛蕾, 徐承红. 长江流域湿地现状及其保护. 生态经济, 2015, 31(12): 10-13.
[3] 李晓文, 郑钰, 赵振坤, 黎聪. 长江中游生态区湿地保护空缺分析及其保护网络构建. 生态学报, 2007, 27(12): 4979-4989.
[4] 高吉喜. 划定生态保护红线, 推进长江经济带大保护. 环境保护, 2016, 44(15): 21-24.
[5] 陈雯, 孙伟, 吴加伟, 陈诚, 闫东升. 长江经济带开发与保护空间格局构建及其分析路径. 地理科学进展, 2015, 34(11): 1388-1397.
[6] 虞孝感. 长江流域生态安全问题及建议. 自然资源学报, 2002, 17(3): 294-298.
[7] 潘开文, 吴宁, 潘开忠, 陈庆恒. 关于建设长江上游生态屏障的若干问题的讨论. 生态学报, 2004, 24(3): 617-629.
[8] 刘毅, 周成虎, 王传胜, 孙贵艳, 康蕾, 方明. 长江经济带建设的若干问题与建议. 地理科学进展, 2015, 34(11): 1345-1355.
[9] Zhang J X, Liu Z J, Sun X X. Changing landscape in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River from 1977 to 2005: Land use/land cover, vegetation cover changes estimated using multi-source satellite data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2009, 11(6): 403-412.
[10] Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, Kuang W H, Zhou W C, Zhang S W, Li R D, Yan C Z, Yu D S, Wu S X, Jiang N. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(4): 483-494.
[11] Long H L, Heilig G K, Li X B, Zhang M. Socio-economic development and land-use change: Analysis of rural housing land transition in the Transect of the Yangtse River, China. Land Use Policy, 2007, 24(1): 141-153.

[12] Long H L, Tang G P, Li X B, Heilig G K. Socio-economic driving forces of land-use change in Kunshan, the Yangtze River Delta economic area of China. Journal of Environmental management, 2007, 83(3): 351-364.

[13] Lambin E F, Meyfroidt P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(9): 3465-3472.

[14] Long H L, Heilig G K, Wang J, Li X B, Luo M, Wu X Q, Zhang M. Land use and soil erosion in the upper reaches of the Yangtze River: some socio-economic considerations on China's Grain-for-Green Programme. Land Degradation & Development, 2006, 17(6): 589-603.

[15] Carreño L, Frank F C, Viglizzo E F. Tradeoffs between economic and ecosystem services in Argentina during 50 years of land-use change. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 154: 68-77.

[16] Polasky S, Nelson E, Pennington D, Johnson K A. The impact of land-use change on ecosystem services, biodiversity and returns to landowners: A case study in the State of Minnesota. Environmental and Resource Economics, 2011, 48(2): 219-242.

[17] Lawler J J, Lewis D J, Nelson E, Plantinga A J, Polasky S, Withey J C, Helmers D P, Martinuzzi S, Pennington D, Radeloff V C. Projected land-use change impacts on ecosystem services in the United States. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(20): 7492-7497.

[18] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily G C. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(19): 7565-7570.

[19] Bryan B A, Crossman N D. Impact of multiple interacting financial incentives on land use change and the supply of ecosystem services. Ecosystem Services, 2013, 4: 60-72.

[20] 郭泺, 杜世宏, 薛达元, 蔡亮. 长江源区土地覆盖变化与草地退化格局的时空分异. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1219-1225.

[21] 杜际增, 王根绪, 李元寿. 基于马尔科夫链模型的长江源区土地覆盖格局变化特征. 生态学杂志, 2015, 34(1): 195-203.

[22] 潘竟虎. 近 15 年来长江源区土地利用变化及其生态环境效应. 长江流域资源与环境, 2005, 14(3): 310-315.

[23] 万荣荣, 杨桂山. 太湖流域土地利用与景观格局演变研究. 应用生态学报, 2005, 16(3): 475-480.

[24] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Zhuang Q L, Li H P, Wang R R, Su W Z, Zhang J. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020. Science of the Total Environment, 2016, 554-555: 7-16.

[25] 伍星, 沈珍瑶. 长江上游地区土地利用/覆被和景观格局变化分析. 农业工程学报, 2007, 23(10): 86-92, 291-291.

[26] 任平, 程武学, 洪步庭, 周介铭. 基于 PSDR 理论框架下长江上游生态系统退化威胁评价与空间分布研究. 地理科学, 2013, 33(2): 189-194.

[27] 朱万泽, 王玉宽, 范建容, 申旭红, 田兵伟, 魏宗华. 长江上游优先保护生态系统类型及分布. 山地学报, 2011, 29(5): 520-528.

[28] 邓伟. 三峡库区水源涵养重要区生态系统格局动态演变特征. 长江流域资源与环境, 2015, 24(4): 661-668.

[29] 彭丽. 三峡库区土地利用变化及结构优化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.

[30] 黄木易, 何翔. 巢湖流域土地景观格局变化及生态风险驱动力研究. 长江流域资源与环境, 2016, 25(5): 743-750.

[31] 李云生, 周广金, 梁涛, 吴连喜, 刘伟江. 巢湖流域的土地利用变化及其生态系统功能损益. 地理研究, 2009, 28(6): 1656-1664.

[32] 李广宇, 陈爽, 余成, 王肖惠. 长三角地区植被退化的空间格局及影响因素分析. 长江流域资源与环境, 2015, 24(4): 572-577.

[33] 刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2014, 34(12): 3311-3319.

[34] Xu X B, Tan Y, Chen S, Yang G S. Changing patterns and determinants of natural capital in the Yangtze River Delta of China 2000-2010. Science of the Total Environment, 2014, 466-467: 326-337.

[35] Haas J, Ban Y F. Urban growth and environmental impacts in Jing-Jin-Ji, the Yangtze, River Delta and the Pearl River Delta. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 30: 42-55.

[36] 孙鸿烈. 长江上游地区生态与环境问题. 北京: 中国环境科学出版社, 2008: 1-2.

[37] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. Science, 2016, 352(6292): 1455-1459.

[38] Liu J G, Li S X, Ouyang Z Y, Tam C, Chen X D. Ecological and socioeconomic effects of China's policies for ecosystem services. Proceedings of the National academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(28): 9477-9482.

[39] 陆桂华, 杨烨, 吴志勇, 何海, 肖恒. 未来气候情景下长江上游区域积雪时空变化分析——基于 CMIP5 多模式集合数据. 水科学进展, 2014, 25(4): 484-493.

[40] 张阳武. 长江流域湿地资源现状及其保护对策探讨. 林业资源管理, 2015, (3): 39-43.